

Listas de contenidos disponibles en la página principal de la revista ScienceDirect Journal of Arid Environments:

www.elsevier.com/locate/jaridenv Mapeo de servicios de regulación en la región de Marrakech Safi - Marruecos Houda Ghazia, *, Mohammed Messoulia, Mohammed Yacoubi Khebiza, Benis N. Egohb, departamento de Biología, Facultad de Ciencias Semlalia, Universidad Cadi Ayyad, BP 2390, Boulevard Prince My Abdellah, Marrakech, 40000, Marruecos b Consejo de Investigación Científica e Industrial, 11 Jan Cilliers Street, Stellenbosch, 7600, Sudáfrica c Escuela de Ciencias Agrícolas, de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de KwaZulu-Natal, 27 Bolsa privada X01, Scottsville, 3209, Sudáfrica

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Palabras clave: Secuestro de carbono Servicios de ecosistemas de tierras secas Servicios hidrológicos Cobertura de la tierra Regulación del microclima RESUMEN

El mapeo de los servicios del ecosistema (ES) se ha convertido en una herramienta importante para estudiar las contribuciones de la naturaleza a las personas (NCP) espacialmente y gestionar los ecosistemas de manera sostenible. Sin embargo, pocos de estos estudios se han llevado a cabo en África y aún menos en tierras secas. Esto no es sorprendente, ya que las tierras secas en general no han recibido mucha atención en el campo de los servicios de los ecosistemas debido a la percepción de que no proporcionan mucho debido a sus bajos niveles de productividad. Además, no hay muchos datos disponibles para mapear los servicios de los ecosistemas en África. En este estudio, mapeamos los servicios de regulación de la región de Marrakech Safi en Marruecos. Primero, se desarrolló un mapa de cobertura del suelo basado en la información existente. Posteriormente, este mapa de cobertura del suelo se usó para mapear y modelar tres categorías de servicios reguladores en la región, a saber, secuestro de carbono, regulación de microclimas y servicios hidrológicos (regulación y cantidad de agua) utilizando seis indicadores. Nuestros resultados muestran que las tierras agrícolas, que ocupan el mayor porcentaje de área, también secuestraron la mayor cantidad de carbono en el área de estudio. Los bosques secuestraron alrededor del 16% de carbono a pesar de ocurrir en solo el 14% del área y son los más eficientes en el secuestro de carbono cuando se considera el carbono secuestrado por hectárea por año. El tipo de ecosistema con el mayor potencial para suministrar servicios de regulación de agua fue *Quercus ilex* con aproximadamente 200 m³ / ha. El estudio muestra que las áreas de puntos calientes se encuentran en las partes sureste del área de estudio donde se encuentra principalmente el íleo de *Quercus*.

Contrariamente a la creencia de que la mayoría de los sistemas áridos no son productivos y, por lo tanto, no brindan muchos servicios ecosistémicos, nuestros resultados espaciales mostraron que el área alrededor de Marrakech en Marruecos, a pesar de ser árida, proporciona muchos servicios reguladores, incluida la regulación del agua y el microclima. 1. Introducción Las iniciativas globales orientadas hacia el uso sostenible de los ecosistemas para apoyar el bienestar humano requieren que los servicios ecosistémicos (ES), que son los beneficios que los humanos obtienen de la naturaleza, se hagan explícitamente en el espacio. Los ejemplos en los que tal representación espacial sería útil incluyen los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) recientemente aprobados de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, la Convención sobre Biodiversidad (CDB), la Convención de las Naciones Unidas para Combatir la Desertificación (UNCCD) y el Panel Intergubernamental para la Biodiversidad y el Ecosistema Servicios (IPBES). Se han iniciado varios estudios de mapeo para apoyar estas iniciativas (Burkhard et al., 2013; Crossman et al., 2013; Egoh et al., 2008; Maes et al., 2013; Willemen et al., 2017). De acuerdo con Hauck et al. (2013a) los mapas son una poderosa herramienta de comunicación que se puede utilizar para mejorar la focalización de las medidas de política, al servir como soporte para documentos legales y, en algunos casos, puede crear acuerdos entre las

partes interesadas y las autoridades. Además, los mapas se pueden utilizar en los procesos de planificación y gestión para comprender mejor los valores o las compensaciones que surgen de la cobertura del suelo y los cambios en el uso del suelo (por ejemplo, Egoh et al., 2008, 2011; O'Farrell et al., 2011). El número especial sobre el mapeo y la evaluación de los servicios de los ecosistemas en la revista *Ecosystem Services* tenía como objetivo responder a las necesidades de desarrollar métodos para mapear y modelar ES (Willemen et al., 2015). Varios otros estudios también confirman que las decisiones sobre los recursos naturales serían más efectivas, eficientes y defendibles cuando se basen en una cuantificación espacialmente explícita de los servicios del ecosistema (Haines-Young et al., 2012; Nelson et al., 2009; Raudsepp-Hearne et al., 2010). Si bien ha habido un desbordamiento de enfoques de mapeo desarrollados y mapeo de estudios de servicios de ecosistemas en todo el mundo, África parece haberse quedado atrás tanto en términos de mapeo de servicios de ecosistemas marinos como terrestres (Costanza y Kubiszewski, 2012; Egoh et al., 2012a; Liqueste et al., 2013). En muchas áreas del mundo, incluida África, las tierras secas se han descuidado particularmente en este campo de estudio, debido a la baja productividad y la percepción de los servicios limitados del ecosistema. Esta percepción no es necesariamente cierta ya que muchas tierras secas tienen <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.03.005> Recibido el 27 de febrero de 2017; Recibido en forma revisada el 2 de marzo de 2018; Aceptado el 9 de marzo de 2018 * Autor para correspondencia. Dirección de correo electrónico: ghazi.houda@yahoo.fr (H. Ghazi). *Journal of Arid Environments* 159 (2018) 54–65 Disponible en línea el 26 de abril de 2018 0140-1963 / © 2018 Elsevier Ltd. Todos los derechos reservados. T

especies exóticas y ecosistemas que brindan servicios únicos (Egoh et al., 2016). De hecho, estas regiones tienen una mayor demanda de servicios ecosistémicos que la mayoría de las áreas húmedas. Las regiones áridas y semiáridas de África están particularmente limitadas en información espacial y temporal, en parte debido a la falta de recursos. Otro factor que ha causado el retraso en el modelado espacial de ES en África es esta limitación de la disponibilidad de datos. Si bien existen datos para la mayoría de los servicios de aprovisionamiento, la información necesaria para mapear los servicios reguladores es limitada y, a menudo, se reduce a la cobertura del suelo (Egoh et al., 2012a). Para las regiones áridas y semiáridas, la regulación del agua es fundamental para la producción agrícola, así como el suministro sostenible de agua en las corrientes. Del mismo modo, el microclima es de gran importancia ya que se prevé que las temperaturas aumenten con un clima cambiante que puede agregar estrés a la producción agrícola y al uso del agua. Una de las capas de datos más importantes requeridas para el mapeo de ES es la cobertura del suelo (Egoh et al., 2012a). De hecho, Burkhard et al. (2009) proponen un nuevo método para mapear los servicios del ecosistema basado en la integridad de la cubierta terrestre utilizando el conocimiento experto. Sin embargo, la mayoría de los mapas de cobertura terrestre existentes son de escala gruesa de categorías amplias (por ejemplo, bosque, urbano, pastizales) de cobertura sin la especificación necesaria de diferentes tipos de vegetación. Una información más detallada sobre la cobertura del suelo, como los tipos de bosque, puede ser útil, ya que los diferentes tipos de vegetación juegan diferentes roles en el ecosistema. Algunos modelos utilizados para mapear los servicios del ecosistema, como el modelo de la Unidad de Investigación de Cuenas Agrícolas (ACRU), requieren información más detallada y difícil de medir, como los valores mensuales del coeficiente de uso del agua, la fracción de raíces de plantas activas en la zona de la capa superficial del suelo y la precipitación diaria. evaporación de referencia (Warburton et al., 2010). La información sobre la cobertura del suelo en África es limitada y los datos existentes cubren categorías

muy amplias de cobertura del suelo. Por ejemplo, el mapa de cobertura del suelo producido por Mayaux et al. (2004) tiene menos de 30 clases para toda África con la mayor parte del norte de África clasificada como desierto. Por lo tanto, existe la necesidad de crear mapas de cobertura del suelo a una escala local más fina para proporcionar un mapeo ES más preciso. En este estudio, desarrollamos un mapa de cobertura del suelo a escala local para la región de Marrakesh Safi (Fig. 1), utilizando la recopilación de información disponible. Posteriormente, el mapa de la cobertura del suelo se usó para modelar y mapear tres categorías de servicios de regulación en la región: 1) secuestro de carbono, 2) regulación del microclima (usando evapotranspiración, temperatura del suelo y temperatura del dosel) y 3) servicios hidrológicos: cantidad de agua y regulación del agua. Diferenciamos explícitamente cómo cada tipo de vegetación contribuye a los indicadores utilizados para medir la entrega de estas tres categorías de servicios. Finalmente, identificamos puntos de acceso para estos servicios donde la planificación debe llevarse a cabo para priorizar la gestión. Los ES fueron elegidos para reflexionar sobre el fuerte interés y participación de Marruecos en el cambio climático, su impacto futuro en el país y cómo puede afectar la prestación de servicios del ecosistema. Esta región de tierras secas sigue siendo vulnerable a las fluctuaciones climáticas y puede ver cambios en la temperatura y las precipitaciones que podrían tener implicaciones significativas para la productividad limitada del paisaje y, en consecuencia, en la disponibilidad de agua para los millones de personas que viven en esta área (Niang et al., 2014). Los servicios de regulación son uno de los servicios más mapeados en todo el mundo (Egoh et al., 2012a), particularmente en África debido a la importancia de regular servicios como el agua para la producción de alimentos y la infiltración para atenuar las inundaciones (Egoh et al., 2012b) . Sin embargo, ningún estudio que conozcamos ha mapeado los servicios de regulación en el norte de África, ya que la mayoría de los estudios están en el sur y el este de África. Para una región árida, la regulación del agua es crucial para la producción agrícola, el control de la erosión y el mantenimiento del flujo de agua en las corrientes. Del mismo modo, la regulación del microclima es de gran importancia ya que las temperaturas en esta región pueden elevarse hasta 40 ° C en verano. Estas altas temperaturas se verán exacerbadas por el cambio climático, lo que hará que la regulación del microclima sea un importante servicio del ecosistema. Plantar árboles para su sombra (reducción de radiación de onda corta) y enfriamiento evaporativo es un simple 'medio' en la mano de los planificadores urbanos para mitigar el estrés térmico en las regiones climáticas con veranos largos y cálidos (Erell et al., 2011; Shashua-Bar et al., 2011) pero este servicio puede ser provisto por áreas naturales. Las especies arbóreas pueden mitigar el aumento de la temperatura a través del secuestro y almacenamiento de carbono, pero también pueden proporcionar regulación del microclima para regiones como Marruecos. 2. Área de estudio La región de Marrakech Safi es una de las doce regiones de Marruecos que cubre aproximadamente el 5% del área total de Marruecos con 39,167km² (Fig. 1) y una población estimada en 4 millones de habitantes (RGPH, 2015). El clima de la región es semiárido a árido, a excepción de las montañas del Alto Atlas a una altitud entre 1500 m y 2000 m, donde el clima se considera húmedo (MI, Monografía de la región, 2015). La precipitación anual en el área de estudio oscila entre 800 mm en la región montañosa y 190 mm en las tierras bajas. Marrakech Safi es una de las áreas más importantes de Marruecos en términos de biodiversidad (Fennane, 2004; Fennane e Ibn Tattou, 1994). Alberga una gran cantidad de fauna y flora endémicas, incluidas cerca de 423 plantas endémicas (Fennane, 2004), muchas de ellas en la lista roja de la UICN "Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza" (Baillie et al., 2004). El Parque Nacional Toubkal, el parque nacional más grande de

Marruecos, se encuentra en el sur de Marrakech Safi y es considerado como un importante punto de biodiversidad y corredor de la cuenca mediterránea (Dernegi, 2010). Los principales ecosistemas en esta región incluyen bosques, agroecosistemas, agua dulce continental y ecosistemas marinos y costeros. En este estudio, nos enfocamos en el ecosistema terrestre, que consiste principalmente en bosques y agroecosistemas. El ecosistema forestal cubre un área de aproximadamente 500,000ha, de las cuales aproximadamente el 8% son plantaciones, que se encuentran principalmente en las montañas del Alto Atlas en el sur de la región (HCEFLCD, 2005). Los tipos de bosque más importantes en el área de estudio son: *Quercus ilex* [*Quercus rotundifolia*] (157,660ha) también conocido como roble de hoja perenne, *Thuja* [*Tetraclinis articulata*] (136,960 ha) y *Argania* [*Argania spinosa*] (132,910 ha) (Tabla 1) . El agroecosistema se considera los ecosistemas más importantes de la región por su potencial agrícola tanto en Bour (de secano) como en las prácticas agrícolas de riego. La tierra agrícola ocupa hasta el 51% de la región, siendo los cereales el cultivo dominante. H. Ghazi y col. Journal of Arid Environments 159 (2018) 54–65 55 3. Material y métodos 3.1. Desarrollo del mapa de cobertura del suelo No había un mapa de cobertura del suelo adecuado para el área de estudio cuando iniciamos el estudio. Por lo tanto, desarrollamos un mapa de cobertura terrestre sobre la región utilizando la clasificación de cobertura terrestre del espectroradiómetro de imagen de resolución moderada (MODIS) de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) (MCD12Q1) a una resolución espacial de 500 m × 500 m (Friedl et al., 2010) como mapa base y lo corrigió y completó utilizando datos locales del mapa del ecosistema forestal de Marruecos (HCEFLCD, 2005), las áreas irrigadas y presas (DIAEA, 2013) e imágenes de satélite auxiliares (ESRI et al., 2013). Utilizamos ArcGIS10 para manipular el mapa de clasificación MODIS y lo comparamos con el mapeo forestal local obtenido de HCEFLCD (2005). También utilizamos el mapa regional de áreas irrigadas (DIAEA, 2013) para afirmar tierras agrícolas. En todos los casos, se consideró que la información local era más precisa que la clasificación MODIS y, por lo tanto, se impuso al producto final con las amplias clases de bosque de bioma de MODIS reclasificadas utilizando especies locales conocidas. El proceso condujo a un nuevo mapa de cobertura terrestre con la misma resolución horizontal de 500 m en adelante denominado Mapa Híbrido (Fig. 1). El mapa híbrido consta de un total de 6 clases de cobertura del suelo que incluyen agua (cuerpos de agua continentales, incluidos lagos y represas), bosque (que consta de cuatro subclases: *Quercus ilex* (roble siempreverde), *Thuja*, *Argania* y clase de bosque mixto), matorrales (que representan áreas con vegetación dispersa que consiste esencialmente en arbustos discontinuos y vegetación leñosa), la clase de agricultura contiene dos subclases: agricultura de secano (Bour) y agricultura de regadío, la clase urbana consta de todas las áreas construidas dentro de áreas urbanas y la clase de suelo desnudo se refiere a la tierra Con escasa vegetación. Agregamos el mapa de cobertura del suelo desde una resolución espacial de 500 m hasta una cuadrícula de modelado climático (CMG) de 25 km × 25 km sobre la cual los datos climáticos están disponibles cada hora. El producto reconstruido proporciona un conjunto de datos cuadrículados en un CMG sobre la región de estudio con cada CMG que tiene hasta 6 clases de cobertura del suelo (Fig. 1) junto con sus fracciones dentro del CMG obtenido de una resolución más alta a 500 m. Para cada una de las clases de cobertura del suelo en el CMG, se asigna un conjunto de parámetros biofísicos para períodos de 23 tiempos que representan un ciclo anual compuesto de 16 días para la fenología de la vegetación. El mapa híbrido de la cubierta terrestre junto con el conjunto de parámetros biofísicos se utilizan como condiciones límite y lateral al modelo de Biosfera simple utilizado en este estudio para calcular los intercambios turbulentos de flujos de carbono, energía y agua. 3.2. El modelo

Utilizamos el "Modelo de Biosfera Simple" (SiB2) (Sellers et al., 1996; Bounoua et al., 2009) para calcular las variables relevantes para la provisión de los servicios ecosistémicos seleccionados. SiB2 es un modelo biofísico que calcula los intercambios de carbono, energía y agua, entre la superficie terrestre y la atmósfera, utilizando 12 tipos de vegetación, incluidas las zonas urbanas. El modelo también tiene en cuenta las propiedades hidráulicas y térmicas de los diferentes tipos de suelo y utiliza un modelo de conductancia fotosintética acoplada para simular el intercambio simultáneo de la entrada de carbono y la difusión del vapor de agua. El modelo utiliza mapas de cobertura del suelo, mapas de suelo y topografía, pero también tablas de parámetros independientes del tiempo que caracterizan las propiedades fisiológicas, ópticas y morfológicas de la vegetación y el suelo (Sellers et al., 1996). El modelo se alimentó con datos biofísicos basados en satélites y se basó en datos climáticos por hora. Los controladores climáticos se obtuvieron del sistema de asimilación de datos del Sistema de Observación de la Tierra Goddard (GEOS-5) (Reichle et al., 2011) y se corrigió el sesgo utilizando observaciones de estaciones meteorológicas en el área de estudio. El modelo se ha utilizado en múltiples estudios para evaluar el impacto de la urbanización en la temperatura de la superficie (Bounoua et al., 2009, 2015, 2017; Lachir et al., 2016; Zhang et al., 2016), para estudiar los efectos fisiológicos del doble CO₂ atmosférico en la vegetación (Bounoua et al., 1999, 2000) y también para estudiar los efectos de la conversión de la cubierta terrestre en el clima superficial (Bounoua et al., 2002; Al-Hamdan et al., 2016). El modelo genera varias variables relacionadas con el clima, el suelo y la vegetación. Sin embargo, en este estudio consideramos solo los siguientes resultados del modelo como indicadores relevantes para caracterizar los servicios del ecosistema seleccionados: i. Asimilación de carbono para estimar el secuestro neto de carbono por diferentes tipos de vegetación, ii. Pérdida de interceptación de agua del dosel, transpiración del dosel, pérdida de interceptación del suelo y pérdida de evaporación del suelo para estimar la cantidad de agua utilizada para capturar el carbono (Evapotranspiración) + Temperaturas del suelo y del dosel para estimar la contribución de los ecosistemas en la regulación del microclima iii. Resultados de la escorrentía para calcular la contribución de cada ecosistema en los servicios hidrológicos (cantidad de agua y regulación del agua) La mayoría de los modelos utilizan datos ya disponibles en lugar de generar nuevos (Kandziora et al., 2013), de manera similar, los parámetros utilizados en este estudio se extrajeron de Bounoua et al. (2014) quienes cuantificaron la cantidad de riego en regiones semiáridas, incluyendo Marruecos. La resolución de los datos climáticos disponibles fue de 25 km y, por lo tanto, agregamos todos los demás datos a la misma resolución. Para comprender la extensión de cada tipo de cobertura terrestre en cada píxel, también agregamos los píxeles del mapa híbrido que tenía una resolución de 500 m a 25 km para que coincidiera con la resolución de los datos climáticos. También reclasificamos las clases de cobertura terrestre en el mapa híbrido para que coincidan con las del modelo como se muestra en la Tabla 2. Finalmente, calculamos para cada píxel de 25 km las fracciones de cada clase de cobertura híbrida en porcentaje.

3.3. Mapeo de los servicios del ecosistema

Los servicios del ecosistema se evalúan en la región de Marrakech-Safi utilizando seis indicadores, a saber: el secuestro de

carbono, representado por la asimilación neta de carbono (absorción menos respiración); El impacto de la evapotranspiración en la temperatura de la superficie (dosel y temperatura del suelo), en lo sucesivo denominada "regulación del microclima"; Finalmente, se examina el impacto de la escorrentía en los servicios hidrológicos (cantidad de agua y regulación del agua).

3.3.1 Secuestro de carbono

La regulación climática siempre se expresa mediante el secuestro de carbono o el almacenamiento de carbono. Es uno de los servicios ecosistémicos más estudiados, ya que proporciona un beneficio global al reducir el CO₂ atmosférico, aunque la mayoría de los estudios han mapeado las reservas de carbono en lugar del secuestro (Crossman et al., 2013). Se refiere a la cantidad de absorción de carbono por las plantas de la atmósfera y almacenada dentro de sus tejidos. Dado que este es un proceso continuo a lo largo del tiempo, la asimilación de CO₂ se mide en el modelo como $\mu\text{moles} / \text{m}^2 / \text{seg}$. Para permitir que la masa de secuestro de carbono sea comparable, tuvimos que cambiar la unidad a gramos de carbono utilizando la siguiente ecuación: $\text{Assim de C (g / pixel)} = \text{Assim (i, j)} \times \% \text{clase (i, j)} \times \text{Mc} \times \text{Pa} \times \text{H} \times \text{D} \times \text{Y} = (1)$ donde: Assim (i, j): la asimilación de CO₂ en el píxel (i, j) ($\text{moles} / \text{m}^2 / \text{seg}$); % clase (i, j): porcentaje del tipo de vegetación en el píxel (i, j); Mc: masa molar de carbono = 12 g / mol; Pa: área de píxeles (ha) = $\text{dx (m)} \times \text{dy (m)} \times \cos(\text{lat}) / 10000$; H: número de segundos en una hora = 3600; D: número de horas en un día = 24; Y: número de días en un mes = 30.

3.3.2. Regulación del microclima

Los ecosistemas contribuyen a la regulación del clima a diferentes escalas. A mayor escala, la vegetación natural reduce los gases de efecto invernadero de la atmósfera, mitigando el cambio climático. A escala local, la vegetación natural modifica los patrones climáticos como la temperatura, la humedad del aire y la velocidad del viento. Este servicio local se llama regulación de microclimas, que mantiene el equilibrio de temperatura en la superficie del suelo, mejorando las condiciones para la descomposición de la materia orgánica y la liberación de nutrientes del suelo (Murray et al., 1990). Muchos estudios sobre microclima basados ??en mediciones de radiación o mediciones micrometeorológicas ya han demostrado que el sombreado es la forma más efectiva de moderar el estrés por calor en el verano. (Égerházi et al., 2013, Égerházi and Kovács, 2014; Mayer, 2008; Mayer et al., 2008; Takács et al., 2015). En nuestro estudio, mapeamos la regulación del microclima, que se puede definir como el papel de la naturaleza en la regulación de la temperatura a escala local utilizando la evapotranspiración. La vegetación juega un papel importante en la regulación del microclima a través del cambio de albedo y evapotranspiración. Las plantas liberan vapor de agua (necesario para la formación de nubes) y absorben y emiten energía, lo que a su vez impacta en el clima. Así, la vegetación crea microclima al regular la humedad y la temperatura localmente. Para mapear el servicio de regulación de microclimas, utilizamos dos parámetros clave como indicadores de las salidas de SiB2: Evapotranspiración y temperatura. La importancia de la evapotranspiración en la regulación del microclima puede explicarse de dos maneras. Primero, es el factor más importante, que junto con las precipitaciones influye en el equilibrio del agua. Por lo tanto, las ecuaciones relacionadas con el balance hídrico dependen de la dinámica y características de la vegetación. En segundo lugar, la evapotranspiración influye en la temperatura (Zhang et al., 2001). En este estudio, modelamos la evapotranspiración como la cantidad de agua utilizada para capturar el carbono con cuatro datos de entrada, a saber, la pérdida de interceptación de agua del dosel (ECI), la transpiración del dosel (ECT), la interceptación del suelo (EGI) y la evaporación del suelo (EGS). Se utilizó la siguiente ecuación: $\text{Evapotranspiración} = \text{ECT} + \text{ECI} + \text{EGS} + \text{EGI}$ (Watt / m^2)

2) La evapotranspiración se presenta como flujo con la unidad de watt / m² en la salida del modelo. Para conocer la cantidad exacta de agua utilizada en la Tabla 2 Equivalente de las clases de

cobertura del suelo del mapa híbrido y SiB2. Clases de mapas híbridos Clases de SiB2 equivalentes Agua T00: aguas continentales Bosques T06: árboles de hoja ancha con cobertura del suelo Agricultura Bour T07: Cubierta vegetal Agricultura irrigada T12: árboles de hoja caduca de hoja caduca con trigo de invierno Urbano T08: arbustos urbanos / edificados T09: arbustos de hoja ancha con suelo desnudo Suelo desnudo T11: sin vegetación: suelo desnudo H. Ghazi et al. Journal of Arid Environments 159 (2018) 54-65 57 evapotranspiración en m3 como unidad, necesitamos cambiar la unidad de vatios a mm de agua de la siguiente manera: $1 W = 0,035 \text{ mm H}_2\text{O} / \text{día}$ según Allen et al. (1998) Para calcular la Evapotranspiración por cada píxel en m3 utilizamos la siguiente ecuación: Evapotranspiración (m / píxel) $\text{Evapo} (W / m) * \% \text{ clase} (i, j) * Pa * a * 10 * 3^2 = M (3)$ donde : $\text{Evapo} W / m^2 = e_{ct} + e_{ci} + e_{gs} + e_{gi} (wm^{-2})$; a: evaporación equivalente $1 W / m^2 = 0,035 \text{ mm} / \text{día}$; $\% \text{ class} (i, j)$: porcentaje de la clase en el píxel (i, j); Pa: área de píxeles (ha) = $dx (m) * dy (m) * \cos (lat) / 10000$; 10: $1 \text{ mm} = 10 \text{ m}^3 / \text{ha}$; M: número de días en el mes. Como se mencionó anteriormente, el modelo proporciona como salidas dos tipos de temperaturas, tanto la temperatura del suelo como la del dosel en grados Celsius como unidad.

3.3.3. Servicios de ecosistemas hidrológicos

Según lo descrito por Bounoua et al. (2009) el agua de la capa superficial puede evaporarse o infiltrarse en la capa de la zona de la raíz desde la cual puede fluir de regreso a la capa superficial y, por lo tanto, si se infiltra en la capa profunda, las plantas pueden usarla para la transpiración, o resurgir de manera simple para contribuir a la escorrentía. En este estudio, mapeamos los servicios hidrológicos como la cantidad de agua que la planta no usa (transpiración) ni se evapora a nivel del suelo, sino que corre por la tierra y está disponible para su uso. Los modelos e indicadores disponibles para el mapeo de servicios hidrológicos van desde simples funciones de balance hídrico a escala de cuenca que vinculan la precipitación, la evapotranspiración real y potencial, la cobertura del suelo y las propiedades de retención de agua del suelo a modelos hidrológicos complejos, basados ??en procesos espacialmente explícitos que simulan la escorrentía diaria calibrada usando largos de precipitación diaria a largo plazo y datos del medidor de flujo (Crossman et al., 2013; CSIRO, 2008). Aquí diferenciamos entre la cantidad de agua (escorrentía superficial) y la regulación del agua.

3.3.3.1. Cantidad de agua

En el modelo, la escorrentía superficial se ve como un parámetro negativo porque puede causar inundación. Sin embargo, como la mayoría de los servicios de los ecosistemas, la capacidad de proporcionar el servicio está determinada por la disponibilidad del servicio. Por lo tanto, la escorrentía superficial se considera un indicador del suministro y la disponibilidad de agua. Varios estudios han utilizado la escorrentía como proxy del suministro de agua (Egoh et al., 2012a). La escorrentía es un indicador simple de la cantidad de agua, que indica la cantidad de agua disponible para diversos usos (por ejemplo, uso doméstico, riego y recreación) ya que la mayor parte de la escorrentía termina en los sistemas fluviales u otros cuerpos de agua. La salida para la escorrentía superficial del modelo está en metros (m). Por lo tanto, convertimos la salida en m3. La siguiente ecuación describe cómo se realizó la conversión. Cantidad de agua (m / píxel) $\text{srf_runoff} (m) * 1000 * \% \text{ clase} (i, j) * Pa * 10^3 = (4)$ donde: $1 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$; $\% \text{ class} (i, j)$: porcentaje de la clase en el píxel (i, j); Pa: área de píxeles (ha) = $dx (m) * dy (m) * \cos (lat) / 10000$ y 10: $1 \text{ mm} = 10 \text{ m}^3 / \text{ha}$.

3.3.3.2. Regulación del agua

La regulación del agua es la cantidad de agua que se infiltra para alimentar la capa freática subterránea. Calculamos la regulación del agua como la escorrentía total (salida de SiB2) menos la escorrentía superficial (cantidad de agua) (ecuación (4)). También cambiamos la unidad de escorrentía total de metro a metro cúbico (m3) para que coincida con la de la escorrentía superficial (Ec. (4)).

3.4.

Identificación de los puntos críticos El concepto de puntos críticos fue iniciado por primera vez por Myers et al. (2000) hace más de dos décadas (Mittermeier et al., 1999) que identificaron puntos críticos de biodiversidad en todo el mundo donde los esfuerzos de conservación deberían centrarse. Dado que surgió el concepto de servicios ecosistémicos, el concepto de identificar puntos críticos de prestación de servicios ecosistémicos apenas comienza a llamar la atención. Uno de los primeros estudios para identificar los puntos críticos de los servicios del ecosistema fue Egoh et al. (2008) en parte basado en la definición de Myers et al. (2000) en la década de 1980 sobre puntos críticos de especies y se refiere a áreas que proporcionan grandes proporciones de un servicio en particular, y no incluyen medidas de amenaza o endemismo. En general, no existe una definición coherente de los puntos críticos de servicios ecosistémicos disponibles en la literatura (Schroter y Remme, 2016), y algunos estudios definen los puntos críticos de ES al incorporar la amenaza como indicador, mientras que otros no (Schroter et al., 2017). En este estudio, consideramos los puntos críticos como las áreas que ofrecen los niveles más altos de servicios ecosistémicos mapeados. En el mapeo de puntos calientes, utilizamos las tres categorías de servicios ya mapeados: secuestro de carbono, servicios hidrológicos (cantidad de agua y regulación del agua) y regulación del microclima (usando solo evapotranspiración como proxy principal). Utilizamos el "índice de puntos críticos" para desarrollar el mapa de puntos críticos. Para hacer esto, normalizamos los indicadores que representan las tres categorías de servicios estudiados con valores entre 0 y 1 y luego los superponemos considerando todo el rango. Luego produjimos el índice de puntos de acceso agregando los puntajes de los servicios normalizados que representan las 3 categorías de servicios en un ráster aplicando el esquema de igual peso. El ráster producido tiene valores de píxeles que oscilan entre 0 y 4 (dado que había dos indicadores para los servicios hidrológicos, la cantidad de agua y la regulación del agua) donde la puntuación de 4 representa áreas con un alto número de servicios y 0 representa áreas con un bajo número de servicios.

4. Resultados

4.1. Secuestro de carbono

Nuestros resultados muestran que aproximadamente el 55% de todo el secuestro de carbono ocurre durante los meses de primavera entre febrero y mayo, y el menor secuestro ocurre entre agosto y octubre. La tierra agrícola es la clase de tierra más grande en el área de estudio y no es sorprendente que haya secuestrado la mayor cantidad de carbono (65%) seguido de las zonas de arbustos (18%). El ecosistema forestal secuestró alrededor del 16% de carbono a pesar de ocurrir en solo el 14% del área de estudio. La cobertura de la tierra forestal también fue más eficiente en el secuestro de carbono al considerar el carbono secuestrado por hectárea por año con 2.01 t de C / ha en comparación con 1.98 t de C / ha para la Agricultura (Tabla 3). De hecho, el tipo de bosque "Quercus ilex", que está hecho de robles de hoja perenne de hoja perenne, secuestra casi la Tabla 3 Carbono mensual secuestrado en cada clase de cobertura del suelo en la región de Marrakech Safi medido en toneladas por hectárea (t C / ha).

Mes	Arbustos	Bosques	Agricultura	Urbano	Suelo desnudo
1	0.11	0.20	0.24	0.006	2
2	0.14	0.21	0.36	0.010	0.014
3	0.17	0.28	0.47	0.017	0.025
4	0.16	0.41	0.41	0.022	0.039
5	0.12	0.31	0.22	0.019	0.032
6	0.04	0.20	0.06	0.016	0.012
7	0.02	0.12	0.03	0.015	0.010
8	0.02	0.06	0.02	0.013	0.009
9	0.02	0.05	0.03	0.010	0.007
10	0.03	0.03	0.007	0.005	11
11	0.03	0.04	0.04	0.003	0.002
12	0.06	0.09	0.07	0.003	0.002
Total por año	0.90	2.01	1.98	0.14	0.16

H. Ghazi et al. Journal of Arid Environments 159 (2018) 54–65 58 4tC / ha / año (Fig. 2) mayor que cualquier otro tipo de cubierta terrestre. La agricultura de secano también secuestró una cantidad importante de carbono (2t C / ha / año) más que los matorrales y los otros tipos de bosques. El pico de secuestro de carbono parece ocurrir generalmente en marzo, pero para el ecosistema de Argania, el pico es en el mes de enero,

debido al período de floración, que generalmente comienza en otoño (Bani-Aameur, 2002). El carbono secuestrado en las partes del sudeste de la región (donde se encuentra *Quercus ilex*) es más que en el suroeste (Fig. 3). También en el noroeste, donde está presente la agricultura agrícola, hay un secuestro significativo.

4.2. Regulación del microclima

La regulación del microclima es una función de la evapotranspiración (Fig. A.1) y la temperatura (Fig. A.2). Nuestros resultados muestran que la temperatura es principalmente baja donde la evaporación / transpiración es mayor y viceversa (Fig. A.3). Esto no es sorprendente ya que la evapotranspiración influye en la temperatura. Sin embargo, la Fig. 4 muestra una alta evapotranspiración tanto en el noroeste como en el sureste del país, pero los patrones espaciales apoyan principalmente la existencia de esta correlación negativa. El pico de evaporación / transpiración es a principios de la primavera, que corresponde a las modestas temperaturas durante el año.

0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 t / ha

Clase de cobertura terrestre Secuestro de carbono (t / ha) Fig. 2.

Secuestro de carbono por diferentes clases de cobertura terrestre (t C / ha / año). Fig. 3. Secuestro de carbono en Marrakech Safi (t C / ha / año). La zona con mayor cantidad de secuestro está representada por un tono más oscuro, el tono más claro representa el área más baja que proporciona la secuenciación de carbono.

H. Ghazi et al. Revista de entornos áridos 159 (2018) 54-65

4.3. Servicios de ecosistemas hidrológicos

4.3.1. Cantidad de agua

Nuestros resultados muestran que la escorrentía superficial es más alta en áreas urbanas con 150 m³ / ha (Fig. 5).

+

+

+

+

+

parte 2

Esto representa el 3% de la escorrentía superficial en el área de estudio, mientras que esta clase ocupaba menos del 1% del área total. La escorrentía total en el área de estudio de acuerdo con los resultados del modelo es igual a 603 Mm³ / año. En contraste con la escorrentía superficial, el suelo desnudo con arbustos tiene la escorrentía total más alta con 300m³ / ha (Fig. 5).

4.3.2. Regulación del agua

En el área de estudio, el ecosistema que proporciona la mayor cantidad de regulación del agua son las áreas agrícolas (Fig. A.4) con aproximadamente 150m³ / ha, el ecosistema con alta capacidad para proporcionar servicios de regulación del agua en el área de estudio es *Quercus ilex* con 200m³ / ha (Fig. 5). El mapeo del suministro de agua en la región de Marrakech Safi (Fig. 6) muestra claramente que las partes del sudeste del área de estudio (zona de bosque y agricultura *Quercus ilex*) son las más importantes para la regulación del agua, pero representan la provisión más baja para la cantidad de agua incluso si esta zona está dominada por montañas. Este resultado destaca el papel que los bosques pueden jugar en la recarga de agua.

Fig. 4. Variaciones espaciales entre a) evapotranspiración (m³ / ha) b) temperatura del suelo (° C) c) temperatura del dosel (° C) en la región de Marrakech Safi. La sombra oscura indica una alta regulación del microclima. (Para la interpretación de las referencias al color en esta leyenda de la figura, se remite al lector a la versión web de este artículo).

Fig. 5. La cantidad de suministro de agua (cantidad de agua y regulación del agua) en comparación con la escorrentía total de cada tierra clase de cobertura en la región de Marrakech Safi por m³ / ha. H. Ghazi y col. Revista de entornos áridos 159 (2018) 54-65

4.4. Identificación de puntos críticos

Los puntos críticos en este estudio representan áreas en las que observamos un número máximo de servicios de ecosistemas reguladores estudiados en la región de Marrakesh Safi (Fig. 7). Los resultados

muestran que la parte sureste del área de estudio es un punto importante en la regulación de los servicios, que también coincide con las áreas de los bosques (especialmente el ecosistema *Quercus ilex*) y la agricultura de regadío (Fig. 1).

5. Discusión

En este estudio, nos propusimos evaluar y mapear los servicios de los ecosistemas reguladores en la región de Marrakech-Safi en Marruecos. Según Everard y Waters (2013), la evaluación del servicio del ecosistema es una herramienta útil para determinar y comunicar el riesgo más amplio de degradación de los ecosistemas en el bienestar humano. Los mapas son particularmente importantes porque pueden ser útiles para la toma de decisiones espacialmente explícitas y el monitoreo de las consecuencias de las decisiones, particularmente en el sector ambiental Hauck et al. (2013a). Los mapas también son importantes para comprender qué hacer en términos de gestión. Nuestros resultados (Tabla 4) mostraron que tanto la agricultura de *Quercus ilex* como la de Bour son importantes en la entrega de múltiples servicios ecosistémicos considerados en este estudio (Fig. 8). Varios estudios han demostrado la importancia de la biodiversidad y, en particular, los bosques en la prestación de servicios ecosistémicos, como el secuestro de carbono, lo que lleva a la iniciativa de las Naciones Unidas para reducir las emisiones de la deforestación y la degradación forestal (REDD) (Keith et al., 2009). Aunque estos estudios no se enfocaron en áreas áridas, se ha demostrado que los árboles en general, incluido *Quercus ilex*, tienen una mayor capacidad para almacenar carbono. En contraste, las áreas agrícolas se han visto principalmente como áreas degradadas sin potencial para proporcionar servicios. Sin embargo, en este estudio, hemos demostrado que las áreas agrícolas pueden proporcionar servicios particulares en regiones áridas con baja cubierta vegetal. En alguna parte de Marruecos, como el municipio de Agoudi N'Lkhir, la mayoría de la agricultura es tradicional (bour) (Bouzekraoui et al., 2016). Este tipo de práctica agrícola puede favorecer la provisión de servicios ecosistémicos que la agricultura industrializada. En este caso, la agricultura de secano debería ser la opción preferida para promover la prestación de servicios ecosistémicos.

Fig. 6. Variación espacial de los servicios hidrológicos en la región de Marrakech Safi: a) RunOff total, b) Cantidad de agua y c) Regulación del agua.

Todos los servicios están representados por m³ / ha. El tono más oscuro se refiere a los altos servicios. (Para la interpretación de las referencias al color en esta leyenda de la figura, se remite al lector a la versión web de este artículo).

Fig. 7. Puntos críticos de los servicios de los ecosistemas en la Región de Marrakech Safi.

El índice más alto (sombra oscura) se refiere a las áreas con servicios de alta regulación (punto de acceso), el más bajo (sombra clara) se refiere al área con menos servicios de regulación. (Para la interpretación de las referencias al color en esta leyenda de la figura, se remite al lector a la versión web de este artículo).

H. Ghazi et al. Journal of Arid Environments 159 (2018) 54–65

61 Los tipos de cobertura de la tierra relacionados con la agricultura *Quercus ilex* y Bour se encuentran principalmente en las partes sur y este del área de estudio, también identificados como un punto de acceso para los servicios del ecosistema. La medida de política para maximizar los múltiples servicios del ecosistema debe estar dirigida hacia estas dos áreas. El Parque Nacional de Toubkal (área protegida) está ubicado en el sur, lo que podría justificar el establecimiento de un área protegida en la región o los efectos resultantes del establecimiento del área protegida. De hecho, varios estudios han demostrado que, a menudo, los puntos críticos de ES están especialmente ubicados dentro de los límites de las áreas naturales protegidas (GarcíaNieto et al., 2013; Palomo et al., 2013; Spanò et al., 2017). Estos resultados también demuestran que la intervención humana no siempre es negativa para los beneficios medioambientales, como se ve en el caso de la agricultura bour. Por el contrario, de acuerdo con nuestra investigación, las áreas urbanas proporcionaron los servicios menos

ecosistémicos. De acuerdo con Bounoua et al. (2009) y Lachir et al. (2016), las áreas urbanas se caracterizan por superficies artificiales, que no pueden proporcionar servicios de regulación importantes. Además, entre los tipos de vegetación, los ecosistemas de *Argania* proporcionan los servicios más bajos. El nivel mismo de servicios de baja regulación proporcionados por este ecosistema puede explicarse por el rango de distribución de esta especie, que se encuentra en un área con muy baja precipitación (menos de 250 mm / año) en comparación con *Quercus ilex*, que recibe más de 500 mm / año. Los resultados de este estudio refutan la suposición de que la mayoría de los sistemas áridos son improductivos e incapaces de proporcionar servicios ecosistémicos importantes. De hecho, el secuestro de carbono encontrado en las áreas forestales de este estudio fue de 2.01 t C / ha / año y es comparable a las encontradas en áreas húmedas como el bosque en Shenyang-China (clima continental húmedo), que fue de 2.84 t / ha / año (Liu y Li, 2012) y más alto que el de Hangzhou-China (1,66 t C / ha / año) donde el clima es subtropical (Zhao et al., 2010). El agrupamiento de las áreas del norte de África y clasificarlas como desérticas puede no revelar el potencial de la prestación de servicios ecosistémicos en la región como se demuestra en este estudio utilizando un mapa de vegetación más fino. Por lo tanto, el desarrollo de mapas detallados de cobertura del suelo / vegetación para el área de estudio es un resultado importante para futuros estudios.

Mientras tenemos la Fig. 8. Prestación de servicios ecosistémicos por diferentes ecosistemas. La escala es de 0 (entrega de servicio más baja) en el centro a 5 (entrega de servicio más alta) hacia el exterior de la araña. La regulación del microclima estuvo representada por la evapotranspiración como el indicador principal. Cuadro 4 Resumen de los servicios anuales de los ecosistemas (basados ??en seis indicadores) producidos en la región de Marrakech Safi por hectárea para cada clase de cobertura del suelo. Secuestro de carbono (t / ha) Regulación del microclima Servicios hidrológicos Evapotranspiración (m3 / ha) Temperatura del dosel (° C) Temperatura del suelo (° C) Cantidad de agua (m3 / ha) Regulación del agua (m3 / ha) Tierras de arbustos 0.90 1149.43 15.80 15.64 40.82 42.10 Bosque mixto 1.44 752.44 14.97 14.97 26.98 118.86 Thuja 1.61 850.21 15.83 15.86 41.46 106.20 *Quercus ilex* 3.67 1659.67 14.18 14.07 38.48 199.48 *Argania* 0.76 497.62 17.80 17.93 34.87 72.22. 81.08 15.60 14.90 150.94 89.89 Suelo desnudo 0.16 110.77 14.47 13.87 55.13 244.76 H. Ghazi et al. Journal of Arid Environments 159 (2018) 54-65 62

limitó este estudio a los servicios de regulación en Marruecos, el país y otros países del norte de África son bien conocidos por su potencial turístico (servicios culturales), así como otros servicios de aprovisionamiento, como el cultivo de olivos. Un mapa detallado de la cobertura de la tierra ayudaría a delinear varios servicios del ecosistema proporcionados y la posible congruencia y compensaciones que pueden surgir en la gestión del paisaje. La selección de escalas espaciales y temporales apropiadas es un desafío recurrente en la aplicación práctica de la ciencia de servicios ecosistémicos (Hauck et al., 2013b). La mayoría de los estudios de mapeo de servicios de ecosistemas han utilizado software popular como INVEST (Crossman et al., 2013). Sin embargo, varios otros softwares y modelos tienen potencial para mapear los servicios del ecosistema como se muestra en este estudio. Hemos utilizado el "Modelo de Biosfera Simple" (SiB2) (Sellers et al., 1996) para mapear los servicios de regulación en Marruecos. Si bien este modelo mostró un gran potencial y posiblemente hay otros modelos disponibles para ser utilizados en este campo de estudio, nuestros resultados deben interpretarse con cuidado por varias razones. Primero, el modelo no se desarrolló para el mapeo del servicio del ecosistema y algunos parámetros, como la escorrentía superficial, se tratan como parámetros negativos. En segundo lugar, el nivel de incertidumbre en el modelo no se comprende bien y, finalmente, como con cualquier modelo, la

adaptación de un modelo existente para responder una nueva pregunta requiere tiempo para la validación dentro del área de estudio. Si bien es importante utilizar cualquier información y modelo disponibles para mapear los servicios del ecosistema donde la información no está disponible, los resultados deben considerarse cuidadosamente. Sin embargo, la ventaja de utilizar dicho "Modelo de Biosfera Simple" (SiB2) es que es muy detallado y más específico que otros modelos generalizados. Otras limitaciones no mencionadas anteriormente incluyen la densidad de la cubierta vegetal y el hecho de que para un campo socioecológico, la demanda de servicios como la presión humana (densidades de población) no se tuvo en cuenta. Agradecimientos Los autores agradecen al Dr. Bounoua Lahouari (NASA Goddard Flight Space, EE. UU.) Por su valioso aporte en el desarrollo de este trabajo. Un agradecimiento especial a la Dra. Dorothy Wanja Nyingi (Museos Nacionales de Kenia) por su ayuda en la edición del idioma. También expresamos nuestro agradecimiento al Editor Invitado y a los dos revisores anónimos por sus comentarios muy constructivos.

Apéndice A. Material de apoyo Fig. A. 1. Evapotranspiración por cobertura del suelo Clases por unidad de m³ por hectárea por año. Fig. A. 2. Comparación de la temperatura del suelo (suelo) y el dosel en cada clase de cobertura del suelo por grados Celsius (° C). Casi las dos temperaturas son iguales a excepción de las clases de suelo urbano y desnudo donde la temperatura del dosel es muy alta que la temperatura del suelo. H. Ghazi y col. Journal of Arid Environments 159 (2018) 54-65 63 Fig. A. 3. (a) Variación de la transpiración del dosel (ECI + ECT) por millón de metros cúbicos (Mm³) en comparación con la temperatura del dosel (° C) y (b) Variación de la evaporación del suelo (EGI + EGS) (Mm³) en comparación con la temperatura del suelo (° C). Fig. A. 4. El servicio de regulación del agua producido por cada ecosistema (clase de cobertura del suelo), presentado por millón de metros cúbicos (Mm³) en la región de Marrakech Safi. Apéndice A. Datos suplementarios Los datos complementarios relacionados con este artículo se pueden encontrar en <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.03.005>.